

Разработанный пикосекундный лазер совместно с генератором второй гармоники были использованы для синхронной накачки параметрического генератора света (ПГС) на кристалле LBO ($\varphi = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$, Тип I) длиной 40 мм.

Диапазон перестройки 115 нм (668–783 нм) (см. рисунок 5) и максимальная средняя мощность 0,7 Вт получены с эффективностью преобразования 24 % при падающей мощности накачки 3 Вт.

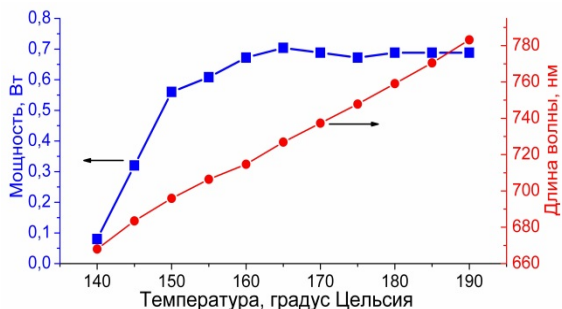


Рисунок 5 – Зависимости выходной мощности и длины волны от температуры кристалла ПГС

Заключение. Проведенная работа показывает высокую перспективность кристаллов Yb:LuAP для применения в качестве активных сред высокоэнергетических лазеров с пассивной синхронизацией мод, генерирующих импульсы пикосекундной длительности.

Литература

1. Viktor E. Kisel et.al., Opt. Lett. 33, 2194–2196 (2008).
2. Alexander Rudenkov et.al, Opt. Lett. 41, 5805–5808 (2016).
3. R.L. Aggarwal et.al., Journal of Applied Physics B 98, 103514 (2005).
4. M.J. Weber et.al., Applied Physics Letters 15, 342 (1969).
5. Alexander Rudenkov et.al., Opt. Lett. 40, 3352–3355 (2015)
6. A.S. Rudenkov et.al, 18th Conference on Laser Optics, St. Petersburg, Russia, 4-8 June 2018. – P. TuR1-16.
7. Alexander Rudenkov et.al, 8th EPS-QEOD Europhoton Conference, Barcelona, Spain, 02–07 September, 2018. – ThA2.3.
8. Alexander Rudenkov et.al, Opt. Lett. 42, 2415–2418 (2017).

УДК 681.787

ИЗМЕРЕНИЕ РАДИУСОВ ЛИНЗ ДЛЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ ОПТИКИ АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Артюхина Н.К.¹, Самусенко А.А.¹, Черных И.В.²

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²ОАО «Пеленг»

Минск, Республика Беларусь

Оптические детали со сферическими поверхностями (линзы, зеркала) являются широко распространенными элементами оптических систем. Качество изображения, создаваемого оптическими системами, во многом зависит от того, насколько точно соответствуют расчетным значениям радиусы кривизны сферических поверхностей, полученные при изготовлении оптических деталей. Поэтому измерение радиусов линз сферических поверхностей является обязательной и весьма ответственной операцией как при изготовлении, так и при контроле оптики, особенно крупногабаритной [1].

Существующие методы контроля радиусов кривизны можно разделить на контактные и бесконтактные. К первым относятся измерения на кольцевых сферометрах и метод пробных стекол, ко вторым – метод контроля с помощью автоколлимационного микроскопа или автоколлимационной зрительной трубы, измерение на фокометре и другие [2].

Современный уровень развития приборостроения позволяет с высокой точностью проводить измерения небольших радиусов оптических поверхностей (в пределах от –1000 до

+1000 мм). Сферометры (рисунок 1, а) выдают кратность значений, равную 0,01 мкм и выше, но являются контактными приборами и при измерении больших значений радиусов могут выдавать значительную ошибку, вызванную небольшим относительным перемещением измерительного элемента – штока.

Высокоточными приборами являются и фокометры. Один из них, MELOS 530 (Германия) (рисунок 1, б) позволяет измерять радиусы кривизны оптических деталей в диапазоне от –480 до +530 миллиметров с погрешностью порядка 0,3 % [3].



Рисунок 1 – Приборы для измерения радиусов кривизны линз

Отметим, что для измерения радиусов оптических поверхностей можно применять и горизонтальные интерферометры, оснащённые измерительной линейкой. Примером является интерферометр Zygo. Однако, его высокая стоимость и иное основное предназначение (измерение качества поверхностей оптических деталей) не позволяют в полной мере использовать данный прибор для измерения радиусов поверхностей.

Таким образом, рассмотренные выше приборы имеют недостатки: являются либо контактными, либо дорогостоящими, либо имеют невысокий диапазон измерений. Потому при контроле больших радиусов оптической поверхности (более 1000 мм по абсолютной величине) следует применять автоколлимационный метод, который осуществляется с помощью микроскопов и зрительных труб, а одним из основных его преимуществ является бесконтактность [4].

В данной работе приведены результаты измерений рабочих и контрольных пробных стёкол с диапазоном радиусов от $-18\,845$ до $+8\,673$ мм автоколлимационным методом по схеме с тест-объектом точкой, на интерферометре и сферометре. Схема измерения автоколлимационным методом представлена на рис. 3:

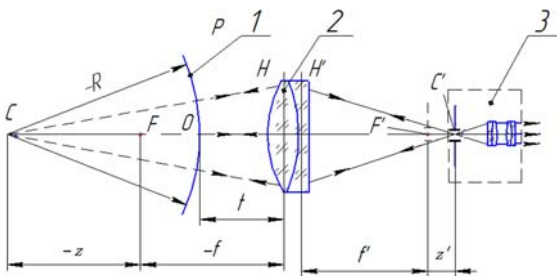


Рисунок 3 – Схема измерения автоколлимационным методом положительных радиусов кривизны:

1 – контролируемая деталь; 2 – объектив зрительной трубы; 3 – автоколлимационный микроскоп

Объектив зрительной трубы предварительно выверяется по автоколлимационному микроскопу на бесконечность. Контролируемая деталь P с радиусом кривизны R устанавливается перед объективом зрительной трубы. Автоколлимационный микроскоп с точечной диафрагмой перемещается вдоль оси от объектива (или к объективу, если поверхность P вогнутая) до получения резкого автоколлимационного изображения точки. Из хода лучей ясно, что центр кривизны сферической поверхности C и точка C', совпадающая с точечной диафрагмой, оптически сопряжены, поэтому к ним применима формула Ньютона

$$zz' = -f'^2. \quad (1)$$

Как можно заметить из схемы, что:

$$-z - f = -R + t. \quad (2)$$

Учитывая, что $-f = f'$, и используя формулу Ньютона, получаем для выпуклых поверхностей:

$$-R = \frac{f'^2}{z} + f' - t \quad (3)$$

Для вогнутых:

$$R = \frac{f'^2}{z'} - f' + t \quad (4)$$

Для оценки величины перемещения z' автоколлимационного микроскопа использовалась специализированная трёхкоординатная подставка фирмы Standa с шагом перемещения винта в 1 мкм и возможностью оценивать величину перемещения винта в автоматическом режиме с помощью специализированного программного обеспечения. Это позволяет с высокой точностью определить значение z' , которое, как видно из (3), (4) имеет определяющее значение при измерении радиусов поверхностей оптических деталей.

Сама же оценка производилась по виду дифракционного изображения точки. Обработка данных и вывод изображения точки осуществлялся через специализированное программное обеспечение Video EVS-2018, которое также применяется для измерения коэффициента передачи модуляции (КПМ), функции концентрации энергии (ФКЭ) и иных критериев качества изображения.

Также для получения сравнительных данных, когда это было возможным, производились измерения на кольцевом сферометре и интерферометре. В итоге, были получены следующие данные для положительных радиусов (приведена выборка для семи радиусов, таблица 1).

Таблица 1 – Результаты измерений положительных радиусов кривизны

Паспортное значение, мм	Сферометр Super-sphere	Интерферометр ZYGO	Автоколлимационный метод
505,718	505,38	505,85	502,601
1013,227	1012,41	1013,22	1012,36
1333,149	1323,60	1329,65	1328,22
2753,473	2721,74	-	2753,069
3731,131	4086,24	-	3723,391
4611,452	4512,09	-	4603,052
8673,342	8578,85	-	8689,108

Измерение отрицательных радиусов кривизны больших размеров на интерферометре произвести невозможно, поэтому приводим сводную характеристику результатов измерений на кольцевом сферометре и автоколлимационным методом (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты измерений отрицательных радиусов кривизны

Паспортное значение, мм	Сферометр Supersphere	Автоколлимационный метод
-2 000,148	-1 963,1	-2 024,05
-2 884,481	-2 823,3	-2 880,59
-5 754,271	-5 644,6	-5 795,21
-7 586,149	-7 525,5	-7 613,46
-9 600,152	-9 379,4	-9 603,52
-16 749,421	-16 344,0	-17 320,28
-18 845,310	-18 058,3	-19 023,45

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что высокую точность при измерении положительных радиусов кривизны величиной до 1500 мм можно получить при измерении всеми вышеперечисленными методами, но при измерении больших радиусов кривизны на сферометре величина отклонения существенно изменяется.

Так, при измерении радиуса кривизны 3 731,131 мм ошибка сферометра составила

9,5 %, в то же время как по автоколлимационному методу отклонение составило -0,21 %. В среднем же отклонение от номинала равняется 0,2 % для положительных радиусов кривизны и 0,9 % для отрицательных.

Величина разброса результатов измерений Δ при контроле радиуса кривизны 8 673,342 мм составила 0,05 %.

Таким образом, автоколлимационный метод является более универсальным для измерения больших радиусов кривизны, а оценка по дифракционному виду точки позволяет учесть индивидуальные особенности зрения операторов, проводящих измерения.

Литература

1. Мальцев М.Д. Прикладная оптика и оптические измерения / М.Д. Мальцев, Г.А. Каракулина. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 409–412.
2. Креопалова Г.В. Оптические измерения / Г.В. Креопалова, Л.Н. Лазареева. – М.: Машиностроение, 1987. – С. 83–91
3. Operating Manual MELOS 530. Version 10/2005, - Muller-Wedel Optical GmbH.
4. Кривовяз Л.М. Практика оптической измерительной лаборатории / Л.М. Кривовяз, Д.Т. Пуряев. – М.: Машиностроение, 1974. – С. 144–146.

УДК 528.084

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ И СОДЕРЖАНИЯ ПИГМЕНТОВ В ОБРАЗЦАХ РАСТЕНИЙ

Силюк О.О., Литвинович Г.С., Ломако А.А., Станчик В.В.,
Гуляева С.И., Бручковский И.И.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Дистанционные измерения растительного и лесного покрова является развивающейся сферой деятельности на сегодняшний день ввиду широкого распространения и применения спутниковых и беспилотных авиационных измерений. Данные таких измерений используются для мониторинга состояния растительности, обнаружения стресса растений на ранних стадиях, исследований видового состава растительности и т.д. Для корректного анализа, верификации и составления методик обработки дистанционно измеренных данных необходимо проведение качественных лабораторных исследований образцов растительности.

Лабораторный комплекс CHERRY (Chlorophyll Estimation and Reflectance Registration sYstem) создан с целью совместных измерений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) образцов растений и количественного содержания в них хлорофилла и других пигментов. Такие совместные измерения представляют научный интерес, так как позволяют проводить исследования корреляций между об-

разцами КСЯ фитоэлементов и содержанием пигментов в них.

Конструктивно комплекс CHERRY состоит из двух частей: гониометра и фотометра. Измерения КСЯ и пигментов производятся при помощи одного спектрометра Solar M150 [1], таким образом минимизируются инструментальные погрешности.

Гониометр предназначен для измерений спектров и последующего вычисления КСЯ объектов с высоким спектральным разрешением в диапазоне 400–2500 нм в надириной геометрии визирования для различных углов возвышения имитатора солнца. В качестве осветителя применяется комбинация квазипараллельного источника (имитатор солнца) и диффузного источника (имитатор неба).

Схема гониометра представлена на рисунке 1. Исследуемый образец, расположенный на вращающейся платформе 1, освещается имитатором солнца, формирующим квазипараллельный световой пучок с высокой степенью равномерности, состоящим из лампы накаливания 2, вогнутого